

Veertig jaar, zes doorbraken

Citation for published version (APA):

van den Herik, H. J., & Postma, E. O. (2008). *Veertig jaar, zes doorbraken: Afscheidscollege door H.J. van den Herik en E.O. Postma*. (1 ed.) Universiteit Maastricht.

Document status and date:

Published: 16/10/2008

Document Version:

Publisher's PDF, also known as Version of record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.umlib.nl/taverne-license

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

repository@maastrichtuniversity.nl

providing details and we will investigate your claim.



H.J. van den Herik en E.O. Postma

Faculty of Humanities and Sciences

Veertig jaar, zes doorbraken

Veertig jaar, zes doorbraken

Colofon

Ontwerp en print: Océ Business Services, Maastricht

ISBN: 978-90-5681-302-4

NUR: 740

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt worden, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de auteur of uitgever.

Veertig jaar, zes doorbraken

Afscheidscollege voor de Universiteit Maastricht
Faculty of Humanities and Sciences
Maastricht ICT Competence Centre (MICC)
Institute for Knowledge and Agent Technology (IKAT)

Maastricht, 16 oktober 2008

H.J. van den Herik en E.O. Postma

Inhoudsopgave¹

1	Saluut en Felicitaties	7
2	Groet en Prestaties	7
3	Woorden van Erkentelijkheid	8
4	Veertig Jaar	9
5	Zoeken en Patroonherkenning	9
6	Zes Doorbraken	11
6.1	Schaken en Go	11
6.2	Rechtspreken	12
6.3	Auditing	12
6.4	Intieme Relaties met Robots	13
6.5	Euthanasie	13
6.6	Schilderijen	13
7	Van Klassiek naar Modern	13
8	Theorie: <i>Recognition-By-Components</i>	14
9	Toetsing door Implementatie	15
10	Principe A: Objectherkenning door Interactie	15
11	Principe B: Tweede-orde Isomorfisme	17
12	<i>Valete et Plaudite</i>	19
	Referenties	21

¹ De tekst is een gezamenlijke tekst. De secties 1-6 zijn uitgesproken door Professor Van den Herik, de secties 7-12 door Professor Postma.

1 Saluut en Felicitaties

Mijnheer de Rector Magnificus, Geachte collega Postma,

Het begin van deze rede neem ik graag te baat om van mijn blijdschap te getuigen. De blijdschap betreft twee successen die ons de afgelopen drie maanden ten deel zijn gevallen. Met zeer veel genoegen feliciteer ik u, collega Postma, samen met Drs. Laurens van der Maaten met de AAAI – *Most Innovative Video Award* die u beiden op 14 juli 2008 is toegekend op AAAI conferentie in Chicago, Illinois. De prijs betreft een “Oscar” voor de video *Digital Analysis of Van Gogh Paintings*.

De video geeft uitleg over een nieuwe visualisatiemethode die de vergelijking van patronen (in dit geval patronen uit de schilderijen van Vincent van Gogh) gemakkelijker maakt. Ieder patroon uit een schilderij wordt vergeleken met de meest voorkomende patronen in alle (zeg, een groot aantal) schilderijen van Van Gogh. Het eindresultaat bestaat uit een verzameling van punten in een plat vlak, waarbij ieder punt een schilderij representeert. De nabijheid van punten is een maat voor de visuele overeenkomst van de bijbehorende schilderijen. Deze methode kan worden gebruikt door kunsthistorici in hun onderzoek naar de authenticiteit en datering van schilderijen.

Mijn tweede felicitatie wil ik graag uitspreken ten gunste van Guillaume Chaslot, de verbindende schakel tussen het Maastrichtse Go-for-Go-team² en het Franse Mogo-team³. Beide teams vonden elkaar op softwaregebied en zochten aanvulling op hardwaregebied. De Nederlandse supercomputer HUYGENS⁴ die bij SARA staat opgesteld was hun natuurlijke partner. Bij SARA werd *stante pede* een HUYGENS-team⁵ geformeerd. Het resultaat van de samenwerking was het nieuwe

² De leden van het Go-for-Go-team zijn: Guillaume Chaslot, Jahn Saito, Mark Winands, Jos Uiterwijk en Jaap van den Herik.

³ De leden van het Mogo-ontwikkelteam zijn: Jean-Yves Audibert, Guillaume Chaslot, Christophe Fiter, Sylvain Gelly, Jean-Baptiste Hoock, Remi Munos, Julien Perez, Arpad Rimmel, Olivier Teytaud, Yizao Wang en Zigin Yu. Andere bijdragen zijn van: Vincent Danjean, Thomas Herault, Georges Bolsilca en David Silver.

⁴ De HUYGENS machine is een IBM POWER6 575 Hydro-Cluster die gefinancierd is door NCF en mede door BIG GRID.

⁵ De leden van het HUYGENS-team zijn: Walter Lioen, Vincent van den Elzen, Rob van der Wal, Marina den Hartog (PR), Axel Berg, Anwar Osseyran, Peter Michiels (NCF) en Patrick Aerts (NCF).

programma MOGO-TITAN. De naam is een impliciete hulde aan Christiaan Huygens, omdat een van zijn ontdekkingen (1655) de maan van Saturnus was, die hij Titan noemde.

Tot 8 augustus 2008 was Go een mysterieus Oosters spel waarbij een sterke grootmeester aan het sterkste computerprogramma negen Go-stenen kon voorgeven en toch nog gemakkelijk kon winnen. Op 8 augustus 2008 wist MOGO-TITAN tijdens the 24th Annual Congress on Go in Portland, Oregon grootmeester Kim Myungwan te verslaan in een *9-stones handicap* match. MOGO-TITAN gebruikte voor deze spectaculaire overwinning 800 processoren, bijna een kwart van het totale aantal (3328) processoren van de HUYGENS. Als u met Google zoekt op HUYGENS, Go en MOGO dan vindt u tienduizend publicaties over deze doorbraak in de wetenschappelijke wereld, de wereld van sport en spel, de wereld van ambities, onze wereld.

2 Groet en Prestaties

Na deze prolegomena wil ik gaarne overgaan tot het officieel uitspreken van het begin (de eerste helft) van onze rede.

Mijnheer de Rector, Dames en Heren,

geachte andere aanwezigen, die eveneens het vermogen hebben om te horen en te begrijpen (ik doel daarbij op mogelijke computers, programma's of agenten onder de aanwezigen),

U hoort er allemaal bij. Wij, Eric Postma en Jaap van den Herik, zijn blij dat u allemaal gekomen bent voor het aanhoren van dit afscheidscollege. Wat hebben wij te zeggen? Heel veel in een korte tijd. Dat wordt dus hard werken.

Het harde werken leverde ons in de loop van vele jaren een mooi aantal resultaten op. U heeft er al twee vernomen, maar ik wil u graag deelgenoot maken van het groepsgebeuren sinds 1987. Via de vakgroep Informatica werden we MATRIKS-Informatica, daarna IKAT en tenslotte MICC-IKAT. Graag sta ik even stil bij de prestaties die IKAT en MICC-IKAT geleverd hebben op het gebied van Onderwijs en Onderzoek.

Op het gebied van Onderwijs hebben wij onze doelstellingen gehaald en overtroffen in samenwerking met de vakgroep Wiskunde. Het betreft

onze opleiding Kennistechnologie. Wij beschouwen in deze rede alleen de prestaties in deze eeuw, om niet te ver in het verleden terug te gaan. We moeten immers nog verder.

In 2002 werd onze opleiding Kennistechnologie door de visitatiecommissie AI beoordeeld als verreweg de beste AI-opleiding in Nederland (van 7 opleidingen) (cf. VSNU, 2002). Deze prestatie werd min of meer herhaald in 2007 toen de visitatiecommissie afzag van een *ranking* maar een kwalitatieve beschrijving gaf van de prestaties van diverse opleidingen (cf. QANU, 2007). Onze toenmalige onderwijsdirecteur Dr. P. Spronck heeft het allemaal nauwkeurig nageplozen en kwam tot de slotsom dat we opnieuw aanspraak konden maken op de nummer één positie. Ik ben het er mee eens, maar ik zeg het wat zachter, want er zitten mogelijk veel bevriende AI-collega's van diverse andere AI-opleidingen in de zaal.

Bij de onderzoeksvisitatie in 2004 deed IKAT het ook bijzonder goed. Er werden daar veel cijfers en kwalificaties uitgedeeld. Als we het geheel samenvatten dan kwamen we op een kwalificatie tussen *zeer goed* en *excellent*. We zijn er nog blij mee.

De visitaties van 2002 en 2004 hadden voorts hun invloed op de metingen die het ministerie van OC&W in die tijd uitvoerde door middel van de methode Kennis-in-Kaart. In 2004 en 2005 werd IKAT afgetekend eerste in de competitie van de Onderwijs- en Onderzoeksprestaties op het gebied van AI in Nederland. In 2006 werd deze Kennis-in-Kaart methode onder druk van de andere universiteiten afgeschaft.

3 Woorden van Erkentelijkheid

Als ik het woord eenmaal overgedragen heb aan collega Postma kom ik in deze rede niet meer bij u terug, misschien nog wel daarna, maar dat is in een andere fase van deze middag. Daarom wil ik op dit moment een aantal mensen bedanken. Ik kan nu eenvoudig het einde van mijn tijd halen door het opsommen van een lange lijst met namen. Ik wil dit niet doen, hoewel de rechtvaardiging van zo'n lijst mij gemakkelijk valt.

Wetenschappelijk gezien bedank ik de rector, onze hoofdman. "Beste Gerard, wat doe je toch altijd weer je best. Graag bedank ik je voor de ruimte die je ons gegeven hebt om onderzoek te doen. Deze rede zal verhalen hoe wij de ruimte hebben ingevuld."

De promovendi mogen essentieel zijn voor het onderzoek – dat is waar –, zij staan evenwel opgesomd in het *Liber Amicorum* dat ik vorig jaar op 12 oktober mocht ontvangen ter gelegenheid van mijn zestigste verjaardag. Hier wil ik graag dank zeggen aan drie dames die mij subliem ondersteund hebben in de afgelopen 21 jaar: Hadewijch Bollen, Tons van den Bosch, en Joke Hellemons. Dank jullie wel, jullie waren onmisbaar.

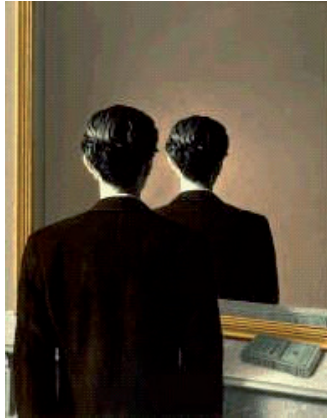
4 Veertig Jaar

Op dit moment wil ik u de titel van de rede uitleggen. Zelf ben ik sinds 1 september 1987 aan de UM verbonden (toen nog Rijksuniversiteit Limburg geheten (RL)). Collega Postma is sinds 1989 aan deze universiteit verbonden. Eerst als AiO, toen als UD, daarna als UHD en sinds 2003 als hoogleraar Informatica / Kunstmatige Intelligentie in het bijzonder gesitueerde modellen van natuurlijke intelligentie. Nu neemt hij dus als hoogleraar, gevierd hoogleraar mag ik wel zeggen, afscheid.

Samen hebben we derhalve $21 + 19 = 40$ jaar aan deze Universiteit onze beste krachten gegeven. Want hard gewerkt hebben we zeker. Hiermee heeft u een verklaring voor het eerste deel van de titel. De verklaring voor het tweede deel volgt spoedig, maar eerst vertellen we u nog graag iets over ons onderzoek in het algemeen en over onze inspiratiebronnen.

5 Zoeken en Patroonherkenning

In mijn wetenschappelijke opvoeding heb ik veel geleerd van Bob Herschberg, de meesterkraker. Op zijn gebied beter dan Aage M. Graag merk ik hierbij expliciet op dat Herschberg op curieuze wijze ver verwijderd was van het criminele domein, omdat hij zich na elke “kraak” direct met de pers in verbinding stelde. Onze samenwerking had betrekking had op intelligente systemen. In het bijzonder onderzochten en publiceerden we over geavanceerde kennissystemen en intelligente schaakprogramma’s. We hadden een vaste positie in zijn huis. Vanuit mijn stoel keek ik altijd tegen een van de beroemde schilderijen van Magritte aan, getiteld *La reproduction interdite* (Figuur 1). We zien daar een man op zijn rug, die in de spiegel kijkt en zijn eigen achterhoofd ziet. Het is verrassend als je het voor het eerst ziet. Het doet denken aan een wereld met een andere logica.



Figuur 1. René Magritte. *La reproduction interdite*.

Dit schilderij inspireerde ons beiden bij de zoekprocessen die wij analyseerden en beschreven in ons onderzoek: echte vondsten kwamen voort uit verrassende logica's. Over de jaren heen noemden wij ons onderzoek: *The land of misrule* (dat was dan gezien vanuit de standaard logica's). Vervolgens was het onze uitdaging in kennelijke willekeur orde aan te brengen. Aanvankelijk deden we dat door veel kennis aan programma's toe te voegen. Daarbij volgden we getrouw de ideeën van Adriaan de Groot (1946) uit *Het Denken van den Schaker*. Het ging



Figuur 2. René Magritte. *La Clairvoyance*.

dan om het intelligentiseren van patroonherkenning met behulp van eenvoudige patronen (Van den Herik en Herschberg, 1986).

Later gingen we over van het regelgebaseerde paradigma (*rule-based paradigm*) naar het datagestuurde paradigma (*data-driven paradigm*). Met z'n tweeën in die kleine ruimte aan de Menno ter Braaklaan beseften we beiden terdege dat goed onderzoek doen een geweldig voorstellingsvermogen vereist. Je weet wat er is en probeert te begrijpen wat er komt. Natuurlijk wist ik dat Bob geïnspireerd was door Einsteins uitspraak: *Imagination is more important than knowledge* (Viereck, 1929)⁶. Pas onlangs echter drong het eerst recht tot me door⁷ dat Bob ook geïnspireerd was geweest door een ander schilderij van René Magritte, namelijk *la Clairvoyance* (Figuur 2). “When writing on science the researcher should transform his observations by means of well-understood ideas in results that are guided by imagination” (De Vlieg, 2008). Beter dan zo kan ik de verbinding tussen wetenschap en kunst niet aangeven.

Toen Bob nog leefde en in goede doen was stuurde ik mijn Ph.D. studenten altijd voor een aantal sessies naar hem toe. Het was een belevenis. Hans Henseler, Victor Allis, Robert van Kralingen, Pepijn Visser en Eric Postma kunnen er smakelijk over vertellen. Hun concept-proefschrift was helemaal rood als ze terugkwamen en hun zelfvertrouwen gebutst. Doch, in de *long run*, heeft het hen alleen maar sterker gemaakt, zoals u straks van één van hen zult horen.

6 Zes Doorbraken

Dan wil ik nu beginnen aan het tweede deel van de titel: zes doorbraken. De ontwikkeling van de AI is stormachtig geweest. Het adagium *Ex nihilo nihil fit* was het eerste adagium dat er aan moest geloven. Kennelijk kun je meer uit een computer halen dan je erin stopt. De reeks: zoeken – representeren – patroonherkennen – leren – formuleren – filosoferen – liefhebben en geloven lijkt onwaarschijnlijk. Toch is er al veel van terecht gekomen.

6 Het letterlijke citaat luidt: “I’m enough of an artist to draw freely on my imagination, which I think is more important than knowledge. Knowledge is limited. Imagination encircles the World”.

7 Dat was bij een lezing van Jacob de Vlieg (Amsterdam PRACE, 3 september 2008) getiteld *The role of knowledge workers and high performance computing in drug discovery & design*. Met dank aan collega De Vlieg voor de ontvouwde gedachte.

Hieronder noemen we zes doorbraken, waarbij het onderzoek dat verricht is vanuit IKAT / MICC-IKAT een belangrijke rol zo niet de beslissende rol speelde bij een doorbraak op wereldniveau.

De doorbraken staan in een niet-chronologische volgorde. De reden daarvoor is dat we getracht hebben de doorbraken te onderbouwen met enige theorievorming en ze te doen aansluiten bij de trends in AI zoals die later zijn waargenomen. De eerste drie doorbraken worden geïllustreerd met voorbeelden en voorzien van een relevante achtergrond. Van de doorbraken 4, 5 en 6 geven we op deze plaats in de rede alleen de probleemstelling. Voor de beantwoording van die probleemstelling dient u eerst over meer theoretische kennis te beschikken. Vanzelfsprekend geven wij u die kennis eerst. Daarna beantwoorden we de vragen.

6.1 Schaken en Go

Sinds het begin van AI staan schaken (Shannon, 1950; Turing, 1953), 8 x 8 dammen (checkers) (Samuel, 1959) in de belangstelling. Later voegde Go zich bij deze twee (Remus, 1963; Zobrist, 1970; Ryder, 1971). Er zijn vijf essentiële onderzoeksvragen te beantwoorden.

- (1) Kan een computerprogramma een adequate partij spelen?
- (2) Kan een computerprogramma op grootmeesterniveau spelen?
- (3) Kan een computerprogramma sterker spelen dan de wereldkampioen?
- (4) Kan een computerprogramma het spel oplossen?
- (5) Zijn er generieke ideeën die elders toepasbaar zijn?

Bij vraag (4) gaat het om het vaststellen van de theoretische uitslag bij optimaal spel van beide zijden. Voor checkers is dat gelukt. Het spel is remise, zie Schaeffer *et al.* (2007).

In de afgelopen 21 jaar heeft het computerschaakonderzoek de onderzoeksvragen 2 en 3 bevestigend beantwoord. Daarbij werd het verslaan van de wereldkampioen als doorbraak gezien.

Doorbraak 1a: Op 11 mei 1997 versloeg het schaakprogramma DEEP BLUE wereldkampioen Kasparov met 4-2.

Deze overwinning kwam na een nederlaag van DEEP BLUE tegen Kasparov in 1996, in een match die mede door de ICCA was georganiseerd

(*Headquarters* van de ICCA was in Maastricht). In 1997 nam IBM de organisatie zelf geheel ter hand. Een zijdelingse betrokkenheid die vermeldenswaard is betreft het gebruik van Dap Hartmann's (1987a,b) DAP TAB, die essentiële patronen haalt uit gespeelde grootmeester-partijen. Het onderzoek van Hartmann (Universiteit Leiden) vond plaats onder supervisie van Van den Herik. Bij Go verliepen de zaken moeizamer. Schaken is een tactisch spel waarbij zoekprocessen een belangrijke rol vervullen. Go is een spel van patronen die moeilijk in een evaluatiefunctie te representeren zijn. Tot 2005, of beter nog 2006, leidde iedere mogelijke aanpak tot een zwak spelend programma. Met enig optimisme kon gesteld worden dat onderzoeksvraag 1 bevestigend beantwoord was. De doorbraak kwam via een verdere ontwikkeling van de Monte Carlo search (Brügmann, 1993; Bouzy, 2003) in Monte Carlo Tree search (Chaslot *et al.*, 2008) en de komst van de UCT algoritme (Kocsis en Szepesvári, 2005; Coulom, 2007). Bij dit alles is de prestatie van Erik van der Werf (2005) eveneens vermeldenswaard. Zijn computerprogramma loste het 5 x 5 Go op en beantwoordde zo vraag 4 voor een klein bord: gewonnen voor de eerste speler (zwart).

Om de moeilijkheid van Go nog eens te benadrukken had omstreeks 1990 de Taiwanese zakenman Ing Chang-Ki een prijs van 40.000.000 nieuwe Taiwanese dollars uitgelooft voor het eerste programma dat in staat zou zijn een sterke grootmeester in een *9-stones handicap* wedstrijd te verslaan. De nieuwe technieken brachten uitkomst en hoe dat gegaan is heb ik u aan het begin van deze rede reeds gezegd.

Doorbraak 1b: Op 8 augustus 2008 versloeg het Go-programma Mogo-TITAN grootmeester Kim Myungwan in een 9-stones handicap match.

Intussen heeft het onderzoek op het gebied van abstracte spelen een vervolg gekregen binnen het domein van de commerciële spelen, de virtuele spelen en de video-spellen. Tezamen zijn al deze spelen en spellen onder te brengen onder de naam *Serious Gaming*. Ook daar speelt het MICC-IKAT onderzoek een belangrijke rol in Nederland en in de wereld. Het proefschrift van Spronck (2005) is een goed voorbeeld.

6.2 Rechtspreken

Dit onderwerp, hoe nauw verbonden ook met intelligente programma's, valt een beetje buiten mijn activiteiten voor MICC-IKAT en behoort meer thuis in Leiden. De samenwerking tussen Maastricht en Leiden was

evenwel altijd sterk en wederzijds stimulerend. Bovendien is Bart Verheij (1996) aan deze universiteit gepromoveerd op het mooie proefschrift *Rules, Reasons, Arguments. Formal studies of argumentation and defeat*. Als ik dan toch een doorbraak mag aanwijzen in het kader van intree- en uittreeredes dan kies ik voor mijn inaugurele rede in Leiden (Van den Herik, 1991): *Kunnen Computers Rechtspreken?*

Doorbraak 2: Op 22 juni 1991 was mijn antwoord dat computers in de toekomst recht zouden kunnen spreken, zeker op deelgebieden van het recht, voorpaginanieuws van de Nederlandse kranten.

Later vernam ik van Professor Kooijmans dat hij in de hoogleraarsbanken diverse collega's nauwkeurig had waargenomen. Met name Professor Feenstra (Romeins Recht) trilde van opwinding: zoveel schennis in het heiligdom van de Academia had hij nog niet eerder meegemaakt. Computers mogen geen recht spreken, omdat dit iets is tussen mensen, voor mensen en door mensen. We zijn nu meer dan zeventien jaar verder en zelfs de meest verstokte tegenstander geeft toe: "of ik het nu leuk vind of niet, die computers zijn behoorlijk in opmars."

6.3 Auditing

Het hebben van goede ideeën is mooi, het uitvoeren van goede ideeën is een andere zaak. Professor Ben Veltman bracht me als zaakwaarnemend directeur van MSM in contact met Mohamed Wahdan, een ambitieuze Egyptische onderzoeker. Wahdan had een heel moeilijk onderwerp gekozen: het automatisch schrijven van een auditor's report. Zonder menselijke tussenkomst zouden zaken en feiten met de juiste interpretatie leiden tot een report waarin geen plaats meer is voor "verschuivingen" zoals die plaatsvonden bij Anderson, WorldCom, Enron, Parmalat, A-Hold en recentelijk nog bij Fortis. In dit superambitieuze project werden Wahdan en ik bijgestaan door Professor Eddy Vaassen (Accountancy and Information Management), Professor Hanli Ali en Dr. Pieter Spronck. Het proefschrift van Wahdan (2006) is een pointer en mijlpaal tegelijk. In dit verband zijn we overigens het meest trots op het artikel *When will a Computer Write the Auditor's Report?* (Wahdan et al., 2005)

Doorbraak 3: In 2006 zagen we een definitieve omslag naar het ontwerpen van kennisintensieve programma's voor het formuleren van auditor's

reports om de “verschuivingen” die deskundigen soms aanbrengen zoveel mogelijk te ondervangen.

6.4 Intieme Relaties met Robots

Zoals hierboven aangekondigd geef ik hier alleen de twee relevante probleemstellingen (PS1 en PS2). Deze luiden als volgt.

PS1: In hoeverre zullen emoties die mensen voelen voor andere mensen, voor huisdieren, voor virtuele huisdieren en zelfs voor minder dierachtige artefacten – zoals computers – worden uitgebreid tot het gebied van de robots van de toekomst? (Levy, 2007)

PS2: In hoeverre zullen de normale grenzen van de menselijke seksualiteit worden uitgebreid ten aanzien van de robots van de toekomst? (Levy, 2007)

6.5 Euthanasie

De relevante probleemstelling (PS) luidt als volgt.

PS: Kunnen alle overwegingen die zich in de praktijk voordoen bij beslissingen over de ‘kwaliteit van leven’ in gevallen van euthanasie (bij volwassenen) in principe worden ondergebracht in een kennissysteem? (Hamburg, 2005)

6.6 Schilderijen

De relevante probleemstelling luidt als volgt.

PS: In hoeverre kunnen beeldverwerkingstechnieken en beeldanalysetechnieken kunsthistorici aanvullend ondersteunen bij de bepaling van de authenticiteit van schilderijen? (Berezhnoy, 2009)

7 Van Klassiek naar Modern

Terugkijkend op een periode van 19 jaar onderzoek en onderwijs bij de Universiteit Maastricht heeft één thema bij mij voortdurend centraal gestaan: verwondering over de visuele waarneming van de wereld om ons heen. Bij de aanvang van mijn onderzoek stelde ik mezelf de vraag:

Hoe is het mogelijk dat visuele objecten en taferelen moeiteloos binnen een fractie van een seconde worden herkend?

Bij het beantwoorden van deze vraag bleek het algemene kader van de patroonherkenning bijzonder nuttig te zijn. Eén van de eerste boeken die ik bij de universiteitsbibliotheek leende was de klassieker *Pattern Classification and Scene Analysis* van Duda en Hart (1973). Dit boek handelt niet over patroonherkenning in het brein, maar over de formele statistische technieken en methoden die ten grondslag liggen aan de herkenning van visuele en niet-visuele patronen.

Daarnaast begon ik me te verdiepen in de stormachtige ontwikkelingen in de cognitieve neurowetenschappen waar de nieuwe inzichten in de werking van het visueel systeem zich snel opstapelden.

AI en Patroonherkenning

De artificiële intelligentie gebruikt de patroonherkenning om twee redenen: (1) om inzicht te verkrijgen in de fundamentele mechanismen die ten grondslag liggen aan perceptie (als onderdeel van intelligentie), en (2) om met behulp van deze inzichten betere visuele herkenningsalgoritmen te kunnen ontwikkelen. Deze twee redenen leiden tot een combinatie van fundamenteel en toegepast onderzoek.

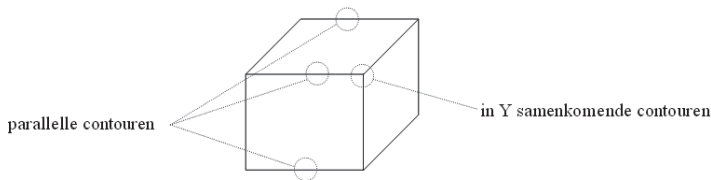
Mijn onderzoek is van meet af aan gemotiveerd geweest door deze combinatie (Postma, 2003). Ik zie dit als volgt. Het onderzoeksgebied van de visuele perceptie omvat een groot aantal theorieën, modellen en hypothesen over de neurale en cognitieve mechanismen die een basis vormen voor de visuele perceptie. Door het ontwikkelen van een simulatiemodel dat de theorie implementeert en door vervolgens het model te testen op de herkenning van natuurlijke afbeeldingen, kan worden vastgesteld of de theorie (een deel van) de menselijke waarnemingsvaardigheid verklaart. Indien het simulatiemodel de visuele herkenningstaak kan uitvoeren, blijft de theorie geloofwaardig. In het geval dat het simulatiemodel de taak niet kan uitvoeren, geeft dat aanleiding tot twijfel over de validiteit van de theorie. Een illustratief voorbeeld van de praktijktoetsing van veronderstelde mechanismen vormt de theorie van de aanzichtonafhankelijke (*view-invariant*) objectherkenning van Irving Biederman (1987). Deze zogenaamde *Recognition-By-Components* (RBC) theorie bouwt deels voort op het werk

van David Marr (1982) en is gebaseerd op een aantal vooronderstellingen ten aanzien van de mechanismen die aanzichtonafhankelijke objectherkenning mogelijk maken (zie hieronder).

8 Theorie: *Recognition-By-Components*

Een van de belangrijkste vooronderstellingen van de RBC-theorie is dat het brein objecten representeert als een configuratie van mentale componenten, bestaande uit zogenaamde geons; een beperkte verzameling van bouwstenen van objectrepresentaties. De geons bezitten een speciaal kenmerk (het bezit van niet-toevallige eigenschappen), waarop ik later terugkom. Objectherkenning komt volgens Biederman neer op het vergelijken (*matchen*) van een beeld op het netvlies met het driedimensionale mentale representatie, de geon-configuratie. Deze matching wordt bemoeilijkt door twee problemen: (1) het beeld op het netvlies is tweedimensionaal, terwijl de mentale representatie (net zoals het object) driedimensionaal is, en (2) het object kan een min of meer willekeurig aanzicht hebben.

Biederman bedacht een geniale oplossing om deze twee obstakels in één klap op te lossen. De kern van de oplossing is de definitie van geons. Hoewel de geons driedimensionaal zijn, hebben ze het kenmerk dat ze te herkennen zijn aan de hand van een beperkt aantal “niet-toevallige eigenschappen” in een tweedimensionale projectie vanuit vrijwel ieder aanzicht. Twee voorbeelden van dergelijke eigenschappen zijn: (i) parallelle contouren en (ii) in een Y samenkomende contouren. Figuur 3 toont een voorbeeld van een geon: een kubus en twee van zijn niet-toevallige eigenschappen. Voor vrijwel alle aanzichten van de kubus



Figuur 3: Illustratie van een geon (kubus) en zijn niet-toevallige eigenschappen. Ontleend aan Biederman (1987).

zijn beide eigenschappen zichtbaar. De essentie van het RBC-model is dat aanzichtonafhankelijke waarneming van object X wordt gerealiseerd door (1) het detecteren van de niet-toevallige eigenschappen van delen van X, (2) het identificeren van de bijbehorende geons, en (3) het matchen van de geon-configuratie met de in het geheugen opgeslagen geon-configuratie.

De theorie van Biederman vormt één van de pijlpalen in de theorievorming van de visuele waarneming. Het stimuleerde een enorme hoeveelheid psychologisch onderzoek. Belangrijker nog, het stimuleerde AI-onderzoekers tot de ontwikkeling van op de RBC-theorie gebaseerde waarneming-systemen. Immers, de RBC-theorie kan beschouwd worden als een blauwdruk voor de ontwikkeling van aanzichtonafhankelijke waarnemingssystemen.

9 Toetsing door Implementatie

De befaamde AI-onderzoeker Rodney Brooks, nu vooral bekend door zijn werk aan robots en de zogenaamde *subsumption*-architectuur, stelde zich – in zijn jonge (prerobot) jaren – ten doel om een (deels) op de RBC-theorie gebaseerd waarnemingsmodel te ontwikkelen. Net zoals veel onderzoekers was hij enthousiast over de geniale oplossing die de theorie leek te bieden voor het lastige probleem van de aanzichtonafhankelijke objectherkenning. De beschreven mechanismen leenden zich uitstekend voor realisatie in een computeralgoritme. Brooks begon vol goede moed aan de implementatie van het model. Het liep echter al mis bij het testen van de module voor de detectie van niet-toevallige eigenschappen. Het bleek helemaal niet gemakkelijk om de contouren van een natuurlijke afbeelding van bijvoorbeeld een kubus te detecteren. Bovendien waren in veel natuurlijke objecten helemaal geen niet-toevallige eigenschappen te herkennen, die te herleiden waren tot geons. De teleurstelling was voor Rodney Brooks aanleiding om zich te storten op “low-level vision” in insectachtige robots. Zijn deels uit frustratie ontwikkelde ideeën beschreef hij in zijn beroemde paper met de voor zichzelf sprekende titel *Elephants don't play chess* (Brooks, 1990). Uiteindelijk leidde zijn onderzoek tot een indrukwekkende humanoïde robot genaamd *cog* (Brooks *et al.*, 1999). Over humanoïde robots later meer.

Het falen van Brooks (en vele andere onderzoekers) om een simulatiemodel te maken dat in staat is tot aanzichtonafhankelijke objectherkenning,

geeft aanleiding tot twijfel over de validiteit van de RBC-theorie. Genoemd falen van Brooks en de inmiddels opgedane kennis over (1) patroonherkenning en (2) de neurale basis van waarneming in het brein, vormden voor mij de aanleiding tot het onderzoeken van twee principes: (A) interactie als basis voor perceptie en (B) tweede-orde isomorfie als basis voor perceptuele representaties in het brein (Postma, 2003). Beide principes en het bijbehorend onderzoek zal ik kort toelichten.

10 Principe A: Objectherkenning door Interactie

De herkenning van objecten komt tot stand door interactie met objecten. Mensen leren niet van statische afbeeldingen, maar door de visuele omgeving en haar objecten actief te exploreren. Dit gegeven wordt al langer onderkend, maar is in de AI eigenlijk pas goed onderzocht door (onder andere) Rodney Brooks. Vanuit Maastricht hebben Rens Kortmann en Michel van Dartel hun promotieonderzoek gericht op elementaire waarneming van agenten (autonome simulatie-robots) gesitueerd in een virtuele omgeving, zogenaamde *gesitueerde agenten*. Rens Kortmann (2003) liet zich daarbij meer leiden door de bio-robotica en ethologisch onderzoek. Michel van Dartel (2005) onderzocht de aard van objectrepresentaties in actieve gesitueerde agenten. Beiden beperkten zich noodzakelijkerwijs tot zeer eenvoudige waarnemingstaken. Hun onderzoek was meer fundamenteel dan toegepast. Meer recentelijk heeft Guido de Croon (2008), die zijn proefschrift met succes verdedigde op 26 juni van dit jaar, verschillende actieve gesitueerde agenten ontwikkeld en succesvol toegepast op de classificatie van natuurlijke afbeeldingen en de detectie van objecten in natuurlijke afbeeldingen. Het onderzoek naar interactieve waarneming vereist eigenlijk het gebruik van fysieke robots. We hebben bij IKAT verschillende bescheiden pogingen gedaan om actieve waarnemingsmodellen in robots te implementeren. In de praktijk bleek echter het werken met robots zeer tijdrovend te zijn. Allerlei praktische, mechanische en elektronische obstakels hebben er toe geleid dat we kozen voor simulatiemodellen die een veel grotere flexibiliteit en efficiency bieden dan robotmodellen.

Voor Rodney Brooks, verbonden aan het prestigieuze MIT, viel deze keuze anders uit. Hij beschikte over een uitgebreid team van mechanica- en elektronica-experts en ontwikkelde *cog*, een inmiddels wereldberoemde robot die allerlei mensachtige taken kan uitvoeren.

Doorbraak 4: *Intieme relaties tussen mens en robot zijn in de toekomst heel gewoon.*

De ontwikkeling van humanoïde robots verloopt langzaam maar gestaag en vormde een van de aanleidingen voor David Levy's (2007) doorbraak onder begeleiding van professoren Maaïke Meijer en Jaap van den Herik. Levy's proefschrift handelt over intieme relaties van mensen en computers (robots), inclusief seksuele relaties. Het trok en trekt wereldwijd de aandacht van de media. Het is veeleer een conceptuele doorbraak dan een technologische doorbraak. Levy heeft geen kunstmatige partner ontwikkeld zoals professor Ishiguro in Japan (zie figuur 4), maar wel op een overtuigende wijze beargumenteerd dat een intieme relatie van een mens met een robot in de toekomst heel gewoon zal zijn.



Figuur 4. Repliee QiExpo and professor Ishiguro.

11 Principe B: Tweede-orde Isomorfisme

Het tweede principe van tweede-orde isomorfe representaties heeft betrekking op de aard van mentale visuele representaties. In Biederman's (1987) theorie lijken de mentale representaties van objecten op de echte objecten. De representaties en objecten zijn (eerste-orde) isomorf. De

onderliggende aanname is dat onze hersenen objecten in de wereld representeren door middel van mentale replica's. In de praktijk blijken onze mentale representaties, hoe sterk ze in onze verbeelding ook lijken op de echte objecten, eerder te voldoen aan het principe van tweede-orde isomorfie. Niet de objecten zelf definiëren de representaties, maar de mate van visuele overeenkomst. Ik illustreer het principe van 1e en 2e orde isomorfe representaties in het kader van een eenvoudige, gesitueerde agent.

Stel een gesitueerde agent neemt een object waar dat ofwel een prooi is (aanvallen) ofwel een roofdier (vluchten). Het beeld van het object wordt geprojecteerd op de kunstmatige retina van de gesitueerde agent en geeft in zijn brein aanleiding tot een aantal actieve neuronen. (Welke dat zijn hangt af van de bedrading in het brein van de agent.) Deze actieve neuronen vormen de interne representatie van het object. De te ondernemen actie is afhankelijk van de aard van het object. Wanneer de objectrepresentatie geactiveerd wordt door een prooi leidt dat tot een aanvalsactie, in het geval van een roofdier leidt dat tot een vluchtactie. Het ligt voor de hand dat de twee representaties, behorende bij aanvallen en vluchten, niet overlappen. Immers, hoe groter de overlap, des te groter het risico op een verkeerde actie. Natuurlijk ziet niet iedere prooi en elk roofdier er hetzelfde uit. De verschillende exemplaren van prooien en roofdieren resulteren in verschillende representaties (groepen van actieve neuronen), waarvan je kunt verwachten dat ze wél een (grote) mate van overlap vertonen. Trouwens, het doet er niet zo veel toe met welk exemplaar van een roofdier je te maken hebt, als de bijbehorende actie maar juist is. Dit resulteert in twee groepen van representaties die duidelijk gescheiden zijn maar toch een behoorlijke overlap vertonen. Als een agent eerste-orde representaties heeft, dan zouden die bestaan uit mentale replica's van de verschillende verschijningsvormen van prooien en roofdieren, met alle complicaties van dien. Voor onze eenvoudige agent zijn eerste-orde representaties nodeloos complex. Het vereist een enorme hoeveelheid *intelligent design* om een eerste-orde representatie tot stand te brengen, maar er is geen enkele functionele rechtvaardiging voor. Een tweede-orde representatie stelt geen andere eisen aan de representaties dan de genoemde overlap en kan door relatief eenvoudige processen (zelforganisatie) tot stand komen.

Het idee van representatie door tweede-orde isomorfisme is niet nieuw. Het werd in 1970 al voorgesteld door de psychologen Shepard en

Chipman (1970). Vanuit de *computer vision* heeft onder andere Shimon Edelman (1999) dit idee in de praktijk gebracht. De patroonherkenning van onder andere Duda en Hart (in 2001 is hun boek *Pattern Classification* in vernieuwde editie en met een derde auteur, David Stork, uitgebracht; Duda, Hart, and Stork, 2001) leent zich uitstekend voor het werken met tweede-orde isomorfe representaties en laat zich prima generaliseren naar niet-visuele domeinen.

Doorbraak 5: Beslissingsondersteunend systeem voor euthanasie is de ontwerpfase gepasseerd.

Het proefschrift van Fred Hamburg (2005) over een patroonherkenningssysteem voor de beslissingsondersteuning bij euthanasie is een mooi voorbeeld van zo'n niet visueel domein en vormt een doorbraak in het medisch-juridisch domein. Ik was als derde promotor, naast de professoren Jaap van den Herik en Heleen Dupuis, betrokken bij zijn proefschrift. Hamburg maakte op basis van juridische en medische overwegingen duidelijk dat de beslissingen over leven en dood die artsen moeten nemen, gemakkelijker en consistenten worden door gebruik te maken van patroonherkenning. Dit revolutionaire idee vormde twee jaar geleden de aanleiding tot een boeiende workshop in Leiden waaraan (toenmalig) bisschop Eijk en (toenmalig) kamerlid Rouvoet deelnamen.

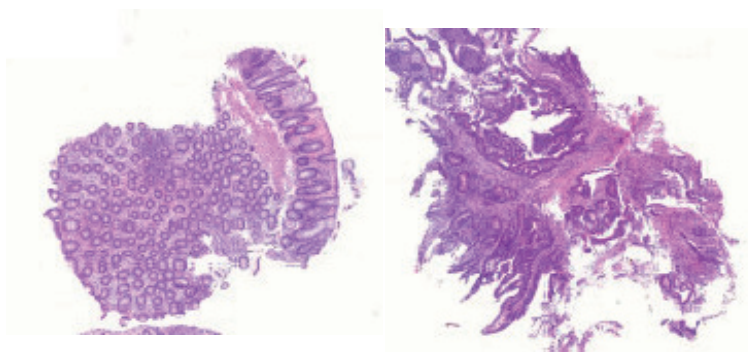
Doorbraak 6: Beslissingsondersteunend systeem voor de analyse van schilderijen doet zijn intrede in de kunstwereld.



Figuur 5. De Zaaier van Vincent van Gogh en een kopie gemaakt door Charlotte Caspers.

De toepassing van tweede-orde isomorfe representaties staat ook centraal bij een doorbraak binnen het visuele domein. Sinds 2000 hebben wij gewerkt aan de automatische classificatie van schilderijen van (onder andere) Van Gogh (Postma en Van den Herik, 2000). Als een van de onderzoekslijnen, heeft het een disproportioneel deel van de media-aandacht gekregen. Sinds de aanvang van het project zijn wij (Igor Berezchnoy, Jaap van den Herik en ondergetekende) geïnterviewd door kranten, radiostations, en tv stations uit alle delen van de wereld. Twee jaar geleden ontving ik een enthousiaste e-mail van een mij onbekende student van de Faculteit der Rechtsgeleerdheid die in China, tussen al het onbegrijpelijke lokale nieuws door, een nieuwsitem zag over ons onderzoek. Onze computerprogramma's zien het verschil tussen een valse en een echte Van Gogh (zie Figuur 5), zelfs wanneer dat verschil voor de menselijke waarnemer moeilijk te zien is. Daar staat tegenover dat onze programma's (nog) geen idee hebben wat er op het schilderij staat, terwijl dat voor een menselijke waarnemer een gemakkelijke opdracht is (Berezchnoy, 2009).

De algoritmen die ten grondslag liggen aan de herkenning van schilderijen werden ook toegepast in het NIM-model voor object- en gezichtsherkenning, waarop Joyca Lacroix promoveerde in 2007 (Lacroix, 2007). Met haar model bleek het mogelijk om de menselijke beoordeling van de gelijkenis van gezichten te voorspellen. Ook in het medische domein kunnen experts worden ondersteund door onze beeldherkenningstechnieken. In nauwe samenwerking met dr. Marius



Figuur 6. Voorbeelden van afbeeldingen voor de diagnostiek van tumoren (met dank aan dr. M. Nap, Pathologie, Atrium Ziekenhuis Heerlen).

Nap van het Atrium Ziekenhuis in Heerlen hebben we veelbelovende resultaten geboekt op de automatische classificatie van tumoren. Figuur 6 toont twee typische voorbeelden. In de toekomst kunnen onze technieken bijdragen aan een efficiëntere werkwijze van pathologen en andere artsen. Ook vanuit Tilburg zetten we dit onderzoek voort, zowel in het medische domein als in nieuwe toepassingsgebieden.

12 *Valete et Plaudite*

Ter afsluiting spreek ik onze dank uit aan de studenten van de opleidingen Kennistechnologie, University College Maastricht en Psychologie voor het stellen van vaak schijnbaar naïeve vragen waarop de antwoorden minder voor de hand lagen dan op het eerste gezicht leek. Dank aan onze collega's binnen en buiten de faculteit voor de samenwerking en de vele discussies over Onderwijs en Onderzoek. Onze voormalige collega's van MICC wensen wij veel succes met de opleiding Kennistechnologie en het daarbij behorende onderzoek. De overige collega's wensen wij veel succes met hun Onderwijs en Onderzoek. Tenslotte dank ik, mede namens Jaap, de Universiteit Maastricht voor de geboden mogelijkheden.

*Diximus*⁸

⁸ Bob Herschberg wilde dit altijd graag vertaald zien met: "Wij leggen het woord neer" of "Wij zijn klaar met spreken". Het is een actie in de tegenwoordige tijd, niet in de voltooid tegenwoordige tijd. Daarom is "Wij hebben gezegd" geen goede vertaling.

Referenties

Biederman, I. (1987). Recognition-by-Components. A theory of human image understanding. *Psychological Review*, Vol. 94, No. 2, pp. 115-147.

Berezhnoy, I.J. (2009). *Digital Analysis of Paintings*. Proefschrift, Universiteit van Tilburg, forthcoming.

Bouzy, B. and Helmstetter, B. (2003). Monte Carlo Go developments. In H. Jaap van den Herik, Hiroyuki Iida, and Ernst A. Heinz (Eds.), *Advances in Computer Games (ACG-10): Many Games, Many Challenges*, pp. 159-174. Boston: Kluwer Academic Publishers.

Brooks, R.A. (1990). Elephants don't play chess. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 6, pp. 3-155.

Brooks, R.A., Breazeal, C., Marjanovic, M., Scassellati, B., and Williamson, M. (1999). The Cog Project: Building a Humanoid Robot. In C. Nehaniv (Ed.), *Computation for Metaphors, Analogy, and Agents*, Vol. 1562 of LNAI, pp. 52-87. Heidelberg: Springer-Verlag

Brügmann, B. (1993). *Monte Carlo Go*. <ftp://ftp.pigs.joyjoy.net/go/computer/mcgo.tex.z>

Chaslot, G.M.J.-B., Winands, H.M.H., Uiterwijk, J.W.H.M., Herik, H.J. van den, and Bouzy, B. (2008). Progressive Strategies for Monte-Carlo Tree Search. *New Mathematics and Natural Computation*, Vol. 4, No. 3, pp. 343-357.

Coulom, R. (2007). Efficient selectivity and Backup Operators in Monte-Carlo Tree Search. In H.J. van den Herik, P. Ciancarini, and H.H.L.M. Donkers (Eds.), *Proceedings of the 5th International Conference on Computers and Games*, Vol. 4630 of LNCS, pp. 72-83. Heidelberg: Springer-Verlag.

Croon, G.C.H.E. de (2008). *Adaptive Active Vision*. Proefschrift, Universiteit Maastricht, 26 juni.

Dartel, M.F. van (2005). *Situated Representation*. Proefschrift, Universiteit Maastricht, 1 december.

Duda, R.O. and Hart, P.E. (1973). *Pattern Classification and Scene Analysis*. New York: John Wiley and Sons.

Duda, R.O., Hart, P.E. and Stork, D.G. (2001). *Pattern Classification* (2nd ed.). New York: John Wiley and Sons.

Edelman, S. (1999). *Representation and Recognition in Vision*. Cambridge, MA: The MIT Press.

Groot, A.D. de (1946). *Het Denken van den Schaker, een Experimenteel-psychologische Studie*. Proefschrift, Universiteit van Amsterdam. Amsterdam: N.V. Noord-Hollandsche Uitgevers Maatschappij.

Hamburg, F. (2005). *Een Computermodel voor het Ondersteunen van Euthanasie-beslissingen*. Proefschrift, Universiteit Leiden, 24 November.

Hartmann, D. (1987a). How to Extract Relevant Knowledge from Grandmaster Games. Part 1: Grandmasters have Insights - the Problem is what to Incorporate into Practical Problems. *ICCA Journal*, Vol. 10, No. 1, pp. 14-36.

Hartmann, D. (1987b). How to Extract Relevant Knowledge from Grandmaster Games. Part 2: the Notion of Mobility, and the Work of De Groot and Slater. *ICCA Journal*, Vol. 10, No. 2, pp. 78-90.

Herik, H.J. van den (1988). *Informatica en het menselijk blikveld*. Inaugurele rede, Rijksuniversiteit Limburg, 21 oktober.

Herik, H.J. van den (1991). *Kunnen Computers Rechtspreken?* Inaugurele rede, 21 juni. Rijksuniversiteit Leiden. Arnhem: Gouda Quint.

Herik, H.J. van den and Herschberg, I.S. (1986). Omniscience, the rulegiver? In B. Pernici and M. Somalvico (Eds.), *Proceedings of L'Intelligenza Artificiale Ed II Gioco Degli Scacchi, III Convegno Internazionale*, pp. 1-17.

Kocsis, L. and Szepesvári (2006). Bandit based Monte-Carlo Planning. In J. Fürnkranz, T. Scheffer, and M. Spiliopoulou (Eds.), *Machine Learning: ECML 2006*, Vol. 4212 of LNAI, pp. 282-293. Heidelberg: Springer-Verlag.

Kortmann, L.J. (2003). *The Resolution of Visually Guided Behaviour*. Proefschrift, Universiteit Maastricht, 4 juli.

Lacroix, J.P.W. (2007). *NIM: A Situated Computational Memory Model*. Proefschrift, Universiteit Maastricht, 20 september.

Levy, D.N.L. (2007). *Intimate Relationships with Artificial Partners*. Proefschrift Universiteit Maastricht, 11 oktober.

Marr, D. (1982). *Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*. San Francisco: W.H. Freeman.

Postma, E.O. (2003). *De Onderste Steen Boven*. Inaugurele rede, Universiteit Maastricht, 13 juni.

Postma, E.O. and Herik, H.J. van den (2000). Discovering the visual signature of painters. In N. Kasabov (Ed.), *Future directions for intelligent systems and information sciences. The future of speech and image technologies, brain computers, WWW, and bioinformatics*, pp. 129-147. Heidelberg: Physica Verlag (Springer-Verlag).

QANU (2007). Artificial Intelligence (Onderwijsvisiting Kunstmatige Intelligentie). Quality Assurance Netherlands Universities (QANU). Utrecht. (www.qanu.nl).

Remus, H. (1963). Simulation of a Learning Machine for Playing Go. *Proceedings of the International Federation of Information Processing Congress* (Munich, Aug. 27-Sept. 1, 1962), pp. 428-432. Amsterdam: North-Holland Publishing Company.

Ryder, J.L. (1971). *Heuristic Analysis of Large Trees as Generated in the Game of Go*. Ph.D. thesis. Stanford University.

Samuel, A.L. (1959). Some studies in machine learning using the game of checkers. *IBM Journal on Research and Development*, pp. 210-229.

Schaeffer, J., Burch, N., Björnsson, Y., Kishimoto, A., Müller, M., Lake, R., Lu, P., and Sutphen, S. (2007). Checkers is solved. *Science*, Vol. 317, No. 5488, pp. 5518-5522.

Shannon, C.E. (1950). Programming a Computer for Playing Chess. *Philosophical Magazine*, Ser.7, Vol. 41, No. 314, pp. 256-275.

Shepard, R.N., and Chipman, S. (1970). Second-order isomorphism of internal representations: Shapes of states. *Cognitive Psychology*, Vol. 1, pp. 1-17.

Spronck, P.H.M. (2005). *Adaptive Game AI*. Proefschrift, Universiteit Maastricht, 20 mei.

Turing, A.M. (1953). Digital computers applied to games, typescript, reproduced as part of a longer article of the same name by Turing *et al.* in *Faster than Thought*, B.V. Bowden, ed., 1953, London: Pitman.

Verheij, B. (1996). *Rules, Reasons, Arguments. Formal studies of argumentation and defeat*. Proefschrift, Universiteit Maastricht, 5 december.

Viereck, G.S. (1929). Interview with Albert Einstein. *Saturday Evening Post*, Philadelphia, October 26.

Vlieg, J. (2008). Persoonlijke communicatie. Citaat lezing PRACE, 3 september (zie voetnoot 7).

VSNU (2002). *De onderwijsvisitatie Kunstmatige Intelligentie*. Vereniging van Universiteiten, Utrecht.

Wahdan, M.A. (2006). *Automatic Formulation of the Auditor's Opinion*. Proefschrift, Universiteit Maastricht, 29 juni.

Wahdan, M.A., Spronck, P., Ali, H.F., Vaassen, E., and van den Herik, H.J. (2006). When will a Computer Write the Auditor's Report? *Systemic Practice and Action Research*, Vol. 18, No. 6, pp. 569-580.

Werf, E. van den (2005). *AI techniques for the game of Go*. Proefschrift, Universiteit Maastricht, 27 januari.

Zobrist, A. L. (1970). *Feature Extraction and Representation for Pattern Recognition and the Game of Go*. Ph.D. thesis, University of Wisconsin.

